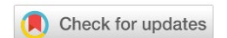
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 539.35

Оригинальное теоретическое исследование

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-9-18

Связь изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с температурой воздуха и солнечной активностью при потеплении климата



EDN: KQQSVJ

А.В. Холопцев ✉

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Российская Федерация

✉ knd@sibpsa.ru

Аннотация

Введение. Совершенствование методик моделирования и прогнозирования изменений количества лесных пожаров, а также повторяемости гроз, их вызывающих, является актуальной проблемой экологической безопасности, безопасности при чрезвычайных ситуациях, а также климатологии. Наибольший интерес ее решение представляет для регионов лесной ландшафтной зоны, одним из которых в России является Ханты-Мансийский автономный округ (Югра). Отечественными и зарубежными учеными установлено, что во многих регионах к числу эффективных предикторов моделей изучаемых процессов относятся вариации среднесезонных температур воздуха над исследуемыми территориями, а также солнечная активность. Вместе с тем связи таких процессов с названными факторами в Югре изучены недостаточно, что не позволяет оценить целесообразность их учета. Целью данной работы является проверка гипотезы о том, что статистические связи изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с синхронными или опережающими их по времени вариациями средних за грозоопасный сезон температур воздуха в приземном слое атмосферы и солнечной активностью являются значимыми и усиливаются. Задачи, которые были решены для достижения поставленной цели, состоят в оценке значимости корреляции между изменениями повторяемости гроз над территорией Югры и синхронными вариациями количества возникающих здесь лесных пожаров, а также синхронными и опережающими по времени вариациями среднесезонных температур воздуха и солнечной активности в период потепления климата.

Материалы и методы. Фактический материал исследования составили данные наблюдений о среднесуточных температурах воздуха и датах, в которые происходили грозы над репрезентативными гидрометеорологическими станциями изучаемого района, информация об изменениях среднегодового потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см, сведения о количестве зарегистрированных лесных пожаров и чрезвычайных ситуаций, ими обусловленных, на территории Югры, представленные в международных и российских климатических банках данных и информационных системах, а также в официальных докладах профильных министерств и ведомств. Методом оценки силы связей между рассматриваемыми процессами явился множественный корреляционный анализ, а оценка статистической значимости выявленных связей выполнена с использования критерия Стьюдента.

Результаты исследования. В результате исследования впервые установлено, что выдвинутая гипотеза о том, что связи изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с вариациями средних за грозоопасный сезон температур воздуха и солнечной активностью являются значимыми и усиливаются, является справедливой. Доказано, что корреляция межгодовых изменений количества лесных пожаров, возникавших в XXI веке на территории Югры за год, с синхронными вариациями повторяемости над ней гроз была значимой и усиливалась. Выявлены условия, при которых статистические связи между изменениями здесь повторяемости гроз, а также вариациями среднемесячных температур воздуха и солнечной активностью значимы и в настоящее время усиливаются. Следовательно, при выполнении этих условий учет рассматриваемых факторов в ходе моделирования и прогнозирования изучаемого процесса целесообразен.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям о влиянии потепления климата и солнечной активности на изменения повторяемости гроз в земной атмосфере, а также об особенностях современных изменений климата Западной Сибири. Выявленные связи могут быть использованы при прогнозировании изменений повторяемостей гроз и лесных пожаров, результаты которого целесообразно учитывать при планировании деятельности соответствующих функциональных подсистем единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: Ханты-Мансийский автономный округ, лесные пожары, грозы, солнечная активность, средние температуры воздуха, корреляция, современный период

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Холопцев А.В. Связь изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с температурой воздуха и солнечной активностью при потеплении климата. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(3):9–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-9-18

Original Theoretical Research

Relationship between Changes in the Frequency of Thunderstorms, the Number of Forest Fires in the Territory of Yugra, and Air Temperature and Solar Activity during Climate Warming

Aleksandr V. Kholoptsev ✉
Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation
✉ knd@sibpsa.ru

Abstract
Introduction. Improving methods for modeling and forecasting changes in the number of forest fires, as well as the frequency of thunderstorms that cause them, is a significant challenge for environmental safety, emergency preparedness, and climatology. This is particularly relevant for regions with a forest landscape, such as the Khanty-Mansi Autonomous Okrug (Yugra). Domestic and foreign researchers have found that variations in seasonal average air temperatures and solar activity are effective predictors for modeling these processes in many regions. However, the connections between these processes and these factors in Yugra remain understudied, hindering our ability to determine the usefulness of including them in predictive models. The aim of the study is to test the hypothesis that there are significant statistical relationships between changes in the frequency of thunderstorms, the number of forest fires in the territory of Yugra, and variations in average air temperatures near the surface of the atmosphere during the thunderstorm season. The study aims to investigate whether these relationships are significant and increasing during periods of climate warming, as well as to assess the impact of solar activity on these relationships. To achieve this goal, we have analyzed the significance of correlation between the changes in the frequency of thunderstorms over the territory of Ugra and synchronous variations in the number of forest fires occurring here, as well as synchronous and ahead of time variations in the average seasonal air temperatures and solar activity in the period of climate warming.
Materials and Methods. The study used observational data on average daily air temperatures, dates of thunderstorms over representative hydrometeorological stations of the studied area, information on changes in average annual solar radiation with a wavelength of 10.7 cm, and information on forest fires and related emergencies in Yugra. The data were obtained from international and Russian climate data banks and systems, as well as official reports from relevant ministries and agencies. The method of assessing the strength of links between processes was multiple correlation analysis. The statistical significance of identified links was assessed using the Student's t-test.
Results. As a result of the study, it was established that the hypothesis put forward was valid. There was the correlation between the changes in the frequency of thunderstorms and the number of forest fires in the territory of Yugra with variations in average air temperatures and solar activity during the thunderstorm season. This trend was significant and increasing. We proved that the correlation of interannual changes in the number of forest fires that occurred in the XXI century in the territory of Yugra per year with synchronous variations in the frequency of thunderstorms over it was significant and intensified. The conditions were identified under which statistical relationships between changes in the frequency of thunderstorms here, as well as variations in average monthly air temperatures and solar activity, were significant and are increasing now. Therefore, when these conditions were met, it was advisable to take into account the factors under consideration during modeling and forecasting of the process under study.

Discussion and Conclusion. The results obtained fully confirm the existing ideas about the impact of climate change and solar activity on the frequency of thunderstorms in the atmosphere, as well as the features of current climate change in Western Siberia. These connections can be used to predict changes in thunderstorm frequency and forest fire risk, and these predictions should be taken into account when planning activities within the unified state emergency management system.

Keywords: Khanty-Mansi Autonomous Okrug, forest fires, thunderstorms, solar activity, mean air temperatures, correlation, modern period

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial team of the Journal and anonymous reviewers for their competent expertise and valuable recommendations for improving the quality of the article.

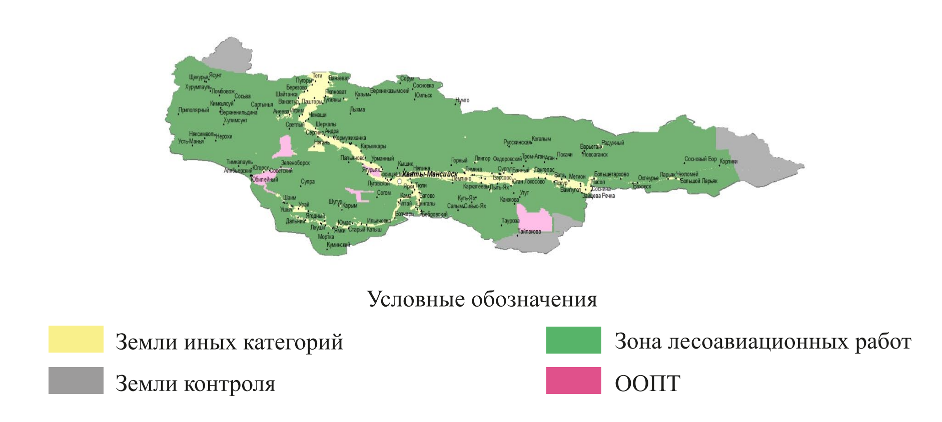
For citation. Kholoptsev AV. Relationship between Changes in the Frequency of Thunderstorms, the Number of Forest Fires in the Territory of Yugra, and Air Temperature and Solar Activity during Climate Warming. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):9–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-9-18

Введение. Причиной некоторых ландшафтных пожаров, возникающих в различных регионах мира и наносящих значительный ущерб экосистемам, по мнению российских [1] и зарубежных исследователей [2], являются проходящие над ними грозы. Поэтому совершенствование методик моделирования и прогнозирования изменений повторяемостей гроз является актуальной проблемой экологической безопасности. Наибольший интерес к решению этой проблемы проявляют регионы, обладающих значительными лесными ресурсами, так как в них ландшафтные пожары, являющиеся преимущественно лесными, причиняют экологии, населению и экономике наибольший ущерб.

В России одним из таких регионов является Ханты-Мансийский автономный округ (Югра). Его территория расположена на Западно-Сибирской низменности и характеризуется практически однообразными таежными ландшафтами[1], вследствие чего гидрометеорологическая станция (ГМС) Ханты-Мансийск (61,01°с. ш., 69,06°в. д.) может рассматриваться для нее как репрезентативная.

52 % площади Югры занято лесами, и возникающие здесь пожары ежегодно причиняют существенный ущерб лесному фонду региона [3]. Важной особенностью рассматриваемой территории является то, что около 30 % всех возникающих лесных пожаров бывают вызваны грозами[2].

На рис. 1 показаны территории Югры, относящиеся к зоне контроля, они сравнительно невелики по площади, а основную часть занимает зона лесоавиационных работ. Поэтому данные из Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз)[3] о количестве лесных пожаров (КЛП) в том иди ином году, возникавших на рассматриваемой территории, вполне достоверны.



Условные обозначения

Земли иных категорий

Зона лесоавиационных работ

Земли контроля

ООПТ

Рис. 1. Участки зон контроля на территории Югры[4]

На территории Югры опасность лесных пожаров повышена потому, что это основной нефтедобывающий регион России. Здесь добыча нефти осуществляется на 406 месторождениях, в том числе на уникальных по своим запасам Самотлорском, Приобском, Федоровском и Мамонтовском [4].

---

[1] Макунина Г.С. *Западно-Сибирская равнина.* Большая российская энциклопедия (2004–2017). URL: https://old.bigenc.ru/geography/text/4138680 (дата обращения: 19.03.2024).

[2] *Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства.* URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 19.03.2024).

[3] *Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства.* URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 19.03.2024).

[4] *Схема расположения зоны контроля на территории Ханты-Мансийского автономного округа.* URL: https://aviales.ru/default.aspx?textpage=229 (дата обращения: 06.05.2024).

Основой существующих представлений о моделировании изменений повторяемости гроз (ПГ), а также КЛП над Сибирью являются работы Барановского Н.В. [5], Иванова В.А. и др. [6]. В них показано, что рассматриваемые процессы могут зависеть от многочисленных факторов, некоторые из них не являются наблюдаемыми, поэтому их целесообразно рассматривать как случайные процессы, при моделировании которых эффективен метод множественной регрессии [7].

Упомянутый метод применим и при прогнозировании. Последнее возможно, если факторы изучаемых процессов, которые в прошлом являлись значимыми, останутся значимыми и в будущем, для которого разрабатывается прогноз. Будущее не предопределено, тем не менее выполнимость указанного условия более вероятна, если в прошлом рассматриваемые статистические связи усиливались [8].

Очевидно, что прогноз изучаемого процесса, построенный с учетом подобного фактора, может соответствовать сценарию, при котором основные закономерности, обуславливающие их динамику, в будущем не изменятся.

В исследованиях многих авторов, например Барановского Н.В. [5], Ивановой Г.А. и др. [9], Копейкина М.А. и др. [10], установлено, что к числу значимых факторов ПГ и КЛП на тех или иных территориях Сибири могут относиться синхронные вариации среднесезонных температур присутствующего над ними воздуха и солнечной активности.

Связь изменений ПГ и средних за грозоопасный сезон температур воздуха (СТВ) у земной поверхности является причинной, так как грозы образуются при термической конвекции в грозовых облаках Cb [11], а интенсивность последней тем выше, чем больше средняя температура воздуха в подоблачном слое [12].

Причинной является также связь изменений ПГ и солнечной активности, поскольку вследствие Форбуш-эффекта [13] последняя значимо влияет на вариации потока галактических и внегалактических космических лучей, входящих в земную атмосферу и участвующих в ионизации воздуха в грозовых облаках. Чем солнечная активность выше, тем интенсивность ионизации воздуха в грозовых облаках ниже, а повторяемость гроз меньше [14].

Связи солнечной активности и изменений СТВ с вариациями КЛП выявлены лишь статистические, тем не менее, в XX веке они были значимы на протяжении нескольких десятилетий [15]. Так как в XX веке оба указанных фактора изучаемых процессов являлись значимыми, их, как правило, учитывают при моделировании. Вопрос о том, целесообразно ли учитывать эти факторы в задачах прогнозирования изучаемых процессов, освещен недостаточно. Установлено, что в спектрах изменчивости ПГ и СТВ присутствуют квазидвухлетние моды [8], вследствие чего статистическая связь между их вариациями при сдвигах по времени на 2–3 года в принципе возможна. Основной модой спектра солнечной активности является одиннадцатилетняя, что также свидетельствует о возможности существования значимой корреляции между изменениями ее характеристик, сдвинутыми по времени на единицы лет [16].

Следовательно, связи изменений ПГ и КЛП с рассматриваемыми факторами, опережающими их на такое время, возможны потому, что эти связи свойственны самим этим факторам. Тем не менее, значимость подобных связей далеко не очевидна.

Представления о значимости рассматриваемых факторов основываются на результатах мониторинга, который проводился в XX веке. Вместе с тем перемены климата, произошедшие на территории Югры в XXI веке, а также разнообразные антропогенные воздействия на экосистемы лесов этого региона могли нарушить связи между изучаемыми процессами и некоторыми их факторами [17]. В результате последнего учет таких факторов при прогнозировании изучаемых процессов может не улучшать, а, напротив, ухудшать оправдываемость его результатов.

В XXI веке мониторинг изучаемых процессов и рассматриваемых их факторов в регионе продолжается. Тем не менее, наличие у связей между его результатами свойств, которые обуславливают целесообразность их учета при моделировании и прогнозировании этих процессов, ранее не проверялось. В результате чего целесообразность их учета нуждается в подтверждении. Следовательно, оценка значимости корреляции между изучаемыми процессами и их факторами, совпадающими и опережающими их по времени, а также выявление тенденции ее изменений представляет не только теоретический, но и практический интерес.

С учетом изложенного целью данной работы является проверка предположения о том, что статистические связи изменений ПГ и КЛП для территории Югры с синхронными или опережающими их по времени вариациями СТВ в приземном слое атмосферы и солнечной активностью в современном периоде являются значимыми и усиливаются.

Для достижения указанной цели проведена оценка значимости корреляции между ПГ над территорией Югры и синхронными изменениями КЛП, синхронными вариациями СТВ и солнечной активности, опережающими по времени вариациями СТВ и солнечной активности для периода современного потепления климата.

Материалы и методы. Как фактический материал о среднесуточных температурах воздуха над репрезентативной ГМС, а также о датах, в которые здесь происходили грозы, использовалась информация, представленная в банке данных об изменениях метеоусловий в различных регионах мира[5], которая соответствует периоду 1961–2023 гг.

[5] *Глобальные климатические данные.* URL: https://en.tutiempo.net/climate (дата обращения: 13.05.2024).

Значение ПГ определялось как отношение количества суток, принадлежащих к грозоопасному сезону (май–сентябрь) изучаемого года, в которые над репрезентативной ГМС возникали грозы, к его общей продолжительности (15 суток).

Значение СТВ вычислялось как среднее значение среднесуточных температур приземного слоя атмосферы над той же ГМС за период с 1 мая по 30 сентября каждого года.

Сведения о КЛП на территории Югры за период 2000–2023 гг., которые также рассматривались как фактический материал, получены из ИСДМ-Рослесхоз[6].

В качестве фактического материала о солнечной активности использована информация из базы данных изменения глобальных климатических индексов[7], об изменениях среднегодового потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см (индекс СА), измерения которого возможны при любых метеоусловиях и наиболее точны.

Как характеристика силы связи между изучаемыми процессами рассматривалось значение коэффициента их корреляции.

С учетом длины рассматриваемых временных рядов КЛП значения коэффициента их корреляции с синхронными рядами ПГ и индекса СА при решении первой задачи оценивались в скользящем окне длиной 11 лет.

Методика решения второй задачи предполагала вычисление значений коэффициента корреляции рядов ПГ и СТВ, а также ПГ и индекса СА в скользящем окне длиной 11, 22 и 44 года за период с 1961 по 2023 г.

При решении третьей задачи вычислялись значения коэффициента корреляции ряда ПГ, а также рядов СТВ и рядов индекса СА, которые опережают его по времени на 1–3 года.

При вычислении значений коэффициента корреляции линейные тренды, присутствующие в сопоставляемых отрезках рассматриваемых временных рядов, соответствующих каждому скользящему окну, предварительно компенсировались.

Значение коэффициента корреляции рассматривалось как значимое, если достоверность такого статистического вывода, оцененная по критерию Стьюдента (с учетом количества степеней свободы рядов), составляла не менее 0,95.

Как характеристика тенденции изменений коэффициента корреляции изучаемых рядов, вычисленных в скользящем окне той или иной длительности, рассматривалось значение углового коэффициента линейного тренда (УКЛТ) временного ряда, образованного из значений этого коэффициента.

Выявленная тенденция с достоверностью 0,95 рассматривалась как значимая, если:

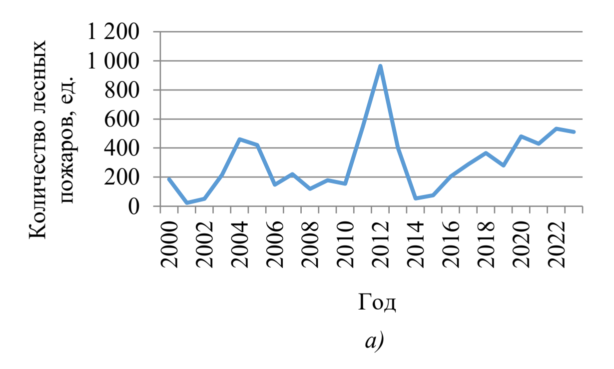
$$N \cdot |A| > 1{,}65 \cdot СКО,$$

где $|A|$ — модуль углового коэффициента линейного тренда рассматриваемого временного ряда, который вычислен по ряду длиной N; $СКО$ — среднеквадратическое отклонение членов этого ряда от соответствующего тренда.

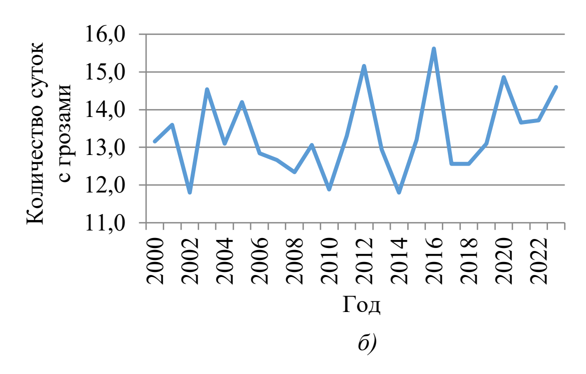
Последнее справедливо, если отклонения членов изучаемого ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону. Тем не менее, проверку справедливости подобного допущения в отношении изучаемых рядов с применением критерия Пирсона не позволила осуществить малая их длина. Поэтому полученные результаты следует рассматривать как носящие качественный характер.

Результаты исследования. В соответствии с изложенной методикой при решении первой задачи сформированы временные ряды количества гроз, возникавших за грозоопасный сезон (а фактически за год) над репрезентативной ГМС и КЛП на территории Югры.

Соответствующие зависимости от времени этих показателей представлены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости от времени количества событий, возникавших за год над гидрометеорологической станцией Ханты-Мансийск: *а* — количество лесных пожаров; *б* — количество суток с грозами

[6] *Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства.* URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 12.10.2023).
[7] *Корреляция среднемесячных значений климатических временных рядов.* URL: https://psl.noaa.gov/data/correlation/solar.data (дата обращения: 13.05.2024).

На рис. 2 видно, что обе показанные на нем зависимости представляют собой сложные колебания, у которых периоды наиболее мощных короткопериодных мод практически совпадают. При этом в период до 2011 года максимумы зависимости от времени количества гроз не совпадают с аналогичными экстремумами такой же зависимости КЛП.

Начиная с 2012 года совпадают почти все одноименные экстремумы рассматриваемых зависимостей, следовательно, их корреляция явно усилилась. Последнее подтверждают и расчеты.

Коэффициент корреляции рассматриваемых рядов за период 2000–2023 гг. составил 0,484, что (при количестве степеней свободы рядов 23) превышает пороговый уровень 0,44, соответствующий достоверности вывода 0,95. Следовательно, корреляция временных рядов ПГ и КЛП для территории Югры значима и в XXI веке (последнее было вполне ожидаемо, поскольку, как уже отмечалось выше, здесь около 30 % лесных пожаров вызвали грозы). Корреляция за тот же период рядов КЛП и СТВ также являлась значимой, что подтверждает справедливость вывода [9] о существенности влияния потепления климата России на возгорание лесов.

Аналогичным образом установлено, что в период 2000–2023 гг. корреляция временных рядов КЛП, а также рядов индекса СА значимой не являлась. Последнее вполне понятно, так как периоды наиболее мощных мод спектров межгодовых изменений КЛП и индекса СА отличаются в 3–4 раза.

Анализ связей временных рядов КЛП на территории Югры с опережающими их по времени рядами индекса СА, СТВ и ПГ над репрезентативным пунктом показал, что корреляция между ними, оцененная в скользящем окне длиной 11 лет, значимой не являлась и с течением времени становилась слабее. Поэтому при моделировании изменений КЛП над территорией Югры учет вариаций индекса СА, СТВ и ПГ целесообразен, однако прогнозирование этих изменений с применением тех же предикторов, опережающих изучаемый процесс на 1–3 года, неэффективно.

В результате решения второй задачи рассчитаны значения коэффициента корреляции синхронных отрезков рядов ПГ и СТВ, а также ПГ и индекса СА, соответствующих скользящим окнам длиной 11, 22 и 44 года.

С учетом этих значений построены зависимости коэффициента указанных рядов от года начала соответствующего скользящего окна (рис. 3).

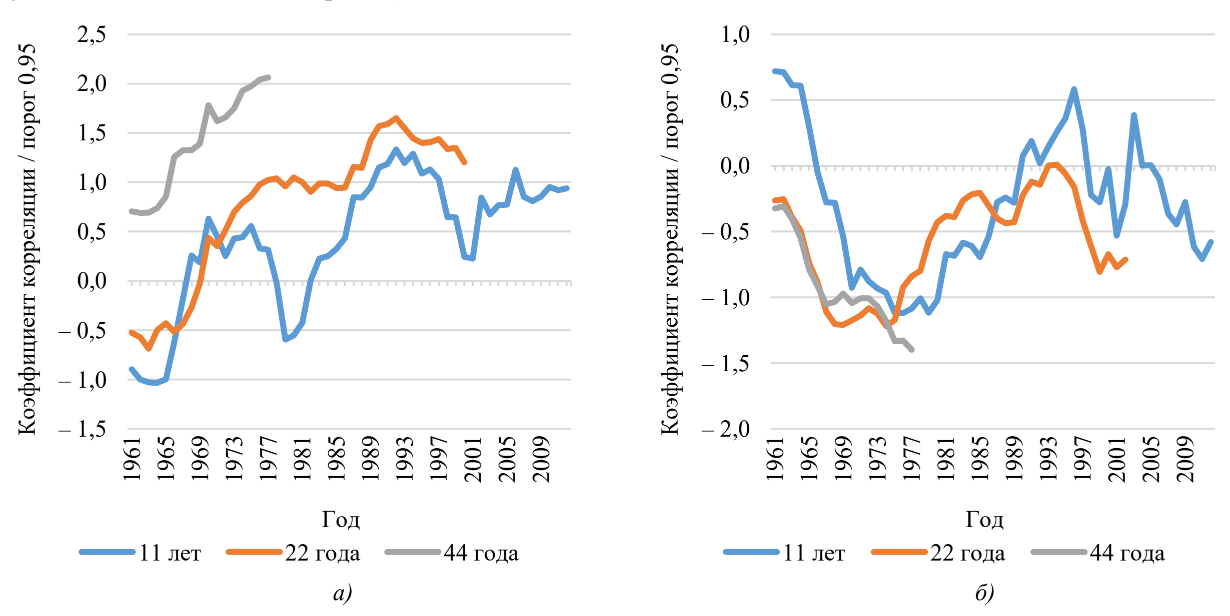


Рис. 3. Зависимости от года начала скользящих окон длиной 11, 22 и 44 года, соответствующих им отношений к порогу значимости коэффициента синхронной корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также вариаций: *а* — СТВ; *б* — индекса СА

Данные на рис. 3 *а* показывают, что зависимости от года начала скользящих окон длиной 22 и 44 года, соответствующих им отношений к порогу значимости коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также синхронных с ними вариаций СТВ описываются в среднем возрастающими функциями. Значения этих показателей для окон, соответствующих современному периоду (2000–2023 гг. и 1978–2023 гг.) превышают 1 (т. е. являются значимыми). Следовательно, сценарий, при котором в ближайшем будущем СТВ останется значимым фактором ПГ, более вероятен, чем альтернативный сценарий.

Рассматриваемая зависимость, которая соответствует скользящему окну в 11 членов, носит осциллирующий характер. Для окна, соответствующего современному периоду (2012–2023 гг.), значение коэффициента корреляции рядов ПГ и СТВ несколько не достигает уровня значимости. Достоверность статистического вывода об их значимости составляет не менее 0,94.

Полученный результат подтверждает целесообразность учета вариаций СТВ при моделировании изменений ПГ над территорией Югры, происходящих в XXI веке.

На рис. 3 *б* показано, что зависимости отношений коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также синхронных с ними вариаций индекса СА к порогу значимости для скользящих окон длиной 11 и 22 года также представляют собой сложные колебания. Значения этого показателя для современных периодов значительно меньше 1 (корреляция значимой не является).

Для скользящего окна длиной 44 года изучаемая зависимость является монотонной, а для периода 1978–2023 гг. корреляция изучаемых процессов отрицательна и значима (достоверность такого вывода превышает 0,95). Следовательно, при моделировании изменений ПГ на столь продолжительных отрезках времени, включающих в себя и современный период, учет вариаций индекса СА также целесообразен.

При решении третьей задачи установлено, что такой же вывод справедлив и для задач прогнозирования изменений ПГ, в которых в качестве предикторов множественно-регрессионных моделей используются ряды индекса СА.

Как подтверждение этому на рис. 4 представлены зависимости от года начала скользящего окна длиной 44 года коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также опережающих их по времени на 1–3 года вариаций индекса СА и СТВ.

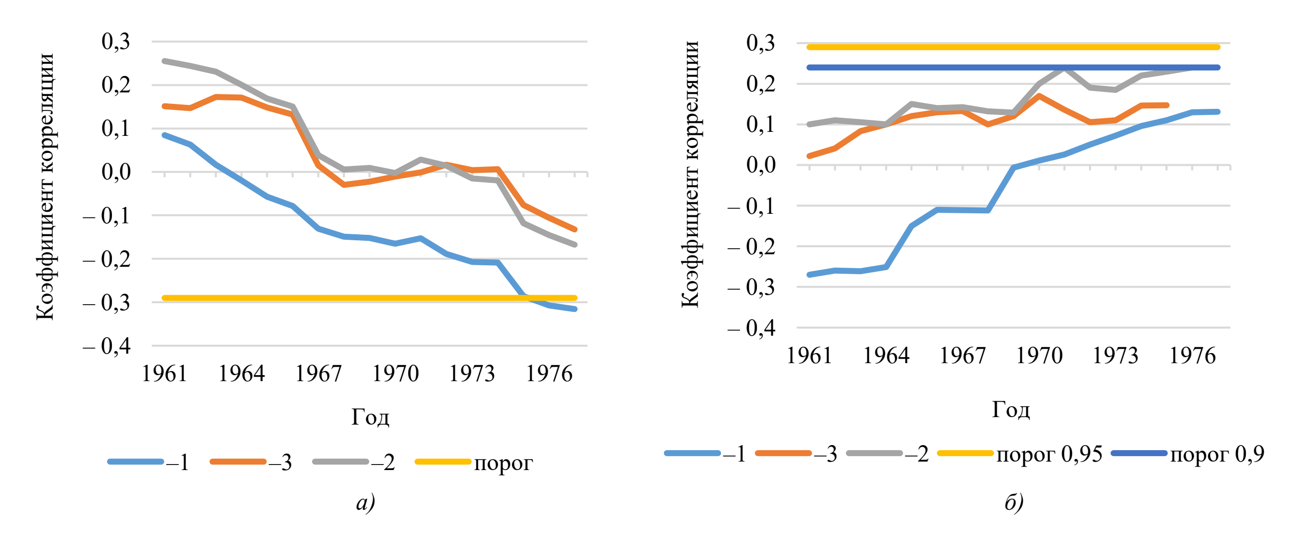


Рис. 4. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 44 года коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также опережающих их по времени на 1–3 года вариаций: *а* — индекса СА; *б* — СТВ

По данным на рис. 4 *а* видно, что за период современного потепления климата корреляция отрезков длиной 44 года временных рядов ПГ над репрезентативной ГМС, а также опережающих их по времени на 1 год отрезков рядов индекса СА усиливалась и на отрезке времени 1975–2023 гг. является значимой.

Если ряды индекса СА опережают ряды ПГ на большее время, их корреляция за тот же период также усиливается, но выбранного уровня значимости не достигает.

Как следует из данных на рис. 4 *а*, вероятность того, что на отрезках времени, включающих в себя также ближайшее будущее, корреляция рядов ПГ и индекса СА останется значимой, выше, чем вероятность альтернативного сценария. Следовательно, учет изменений этого фактора при прогнозировании ПГ над территорией Югры на предстоящий год способствовал бы повышению оправдываемости его результатов.

Данные на рис. 4 *б* свидетельствуют о том, что значения коэффициента корреляции изменений ПГ над той же ГМС на интервале времени длиной 44 года, а также опережающих их на 1–3 года вариаций СТВ за период современного потепления климата увеличивались. Из этого следует, что сценарий, при котором в будущем они станут больше, более вероятен, чем альтернативный сценарий. Вместе с тем достоверность вывода о значимости рассматриваемых связей на отрезке времени 1978–2023 гг. достигла лишь уровня 0,9 (при условии, что ряд СТВ опережает ряд ПГ на 2 года).

Аналогичные исследования, выполненные для сопоставляемых отрезков времени меньшей длины, показали, что зависимости от времени коэффициента корреляции изменений ПГ над той же ГМС, а также опережающих их на 1–3 года вариаций индекса СА и СТВ носят осциллирующий характер (тенденции этих процессов знакопеременны). Для отрезков ряда ПГ, включающих 2023 год, значения коэффициента их корреляции с опережающими по времени рядами рассматриваемых факторов значительно меньше (по модулю) порога значимой корреляции. Следовательно, какие-либо основания полагать, что учет столь коротких отрезков временных рядов рассматриваемых факторов при прогнозировании изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, запаздывающих по отношению к ним на 1–3 года, приведет к положительным результатам, не выявлены.

Таким образом, установлено, что выдвинутая гипотеза в отношении синхронных связей изменений КЛП для территории Югры с вариациями ПГ и СТВ является справедливой. Справедлива она и для синхронных связей изменений ПГ с вариациями СТВ и индекса СА. Рассматриваемая гипотеза справедлива также в отношении связей изменений ПГ, а также вариаций индекса СА, опережающих их на 1 год.

Кроме того, показано, что в настоящее время связи изменений на отрезках времени 44 года ПГ над территорией Югры, а также опережающих их вариаций индекса СА и СТВ усиливаются, вследствие чего в будущем такие связи могут стать значимыми и при других значениях этих опережений.

Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям о влиянии потепления климата и солнечной активности на изменения повторяемости гроз в земной атмосфере [1], в том числе публикуемых Росгидрометом[8], а также об особенностях современных изменений климата Западной Сибири [3].

Обсуждение и заключение. Статистические связи изменений КЛП и ПГ, а также КЛП и СТВ на территории Югры в XXI веке не только являются значимыми, но и существенно усиливаются. Следовательно, целесообразен и учет результатов мониторинга СТВ и ПГ при моделировании возгорания лесов на территориях, относящихся к зоне контроля, а также при управлении деятельностью его противопожарных подразделений (согласно Федеральным законам 69-ФЗ и 123-ФЗ).

Корреляция изменений ПГ над территорией Югры, а также совпадающих с ними по времени вариаций СТВ на отрезках времени, завершающихся 2023 годом, значима и усиливается при условии, что их длина составляет не менее 11 лет. Для такого фактора, как вариации индекса СА, она значима и усиливается лишь при условии, что длина соответствующих отрезков не менее 44 лет.

Корреляция изменений ПГ над территорией Югры с опережающими их по времени на 1 год вариациями индекса СА значимы и усиливаются при условии, что она оценена для отрезков времени продолжительностью не менее чем 44 года. При больших значениях таких опережений связь между этими процессами также усиливается, но уровня значимости к 2023 году не достигла.

Таким образом, установлено, что выявленные особенности статистических связей изменений в период современного потепления климата количества лесных пожаров и повторяемости гроз над территорией Ханты-Мансийского автономного округа (Югры) между собой, а также с вариациями среднесезонных температур воздуха и солнечной активности соответствуют существующим представлениям о причинах существования этих связей.

В XXI веке синхронные связи изменений количества лесных пожаров, возникавших за год на территории изучаемого региона, с вариациями повторяемости над ней гроз значимы и усиливаются. Это позволяет предположить, что часть общего количества образующихся здесь лесных пожаров, обусловленных действием грозовых разрядов, в будущем увеличится.

Связи изменений в изучаемом регионе среднесезонных температур воздуха за грозоопасный период с синхронными вариациями повторяемости за тот же сезон гроз и количества лесных пожаров целесообразно учитывать при моделировании этих процессов, так как установлено, что с потеплением климата они усиливались и для современного периода значимы.

Связи изменений солнечной активности с синхронными, а также запаздывающими по отношению к ним на 1 год вариациями повторяемости гроз над рассматриваемой территорией целесообразно учитывать при прогнозировании последних, так как за тот же период произошло их усиление и для современного периода достоверность вывода об их значимости превышает 0,95.

Список литературы / References

1. Иванов В.А., Пономарев Е.И., Иванова Г.А. Малькaнова А.В. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях Средней Сибири. *Метеорология и гидрология.* 2023;7:102–113.

Ivanov VA, Ponomarev EI, Ivanova GA, Mal'kanova AV. Lightning and Forest Fires in Current Climatic Conditions of Central Siberia. *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2023;7:102–113. (In Russ.)

2. Pérez-Invernón FJ, Huntrieser H, Soler S, Gordillo-Vázquez FJ, Pineda N, Navarro-González J, et al. Lightning-Ignited Wildfires and Long-Continuing-Current Lightning in the Mediterranean Basin: Preferential Meteorological Conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021;21(23):17529–17557. https://doi.org/10.5194/acp-2021-125

3. Куплевацкий С.В. Шабалина Н.Н. Лесные пожары в Уральском федеральном округе и их влияние на экологию. *Леса России и хозяйство в них*. 2020;4(75):4–12. https://doi.org/10.51318/FRET.2020.36.84.001

Kuplevatskiy SV, Shabalina NN. Forest Fires in the Ural Federal District and Their Impact on the Environment. *Forests of Russia and Economy in Them.* 2020;4(75):4–12. https://doi.org/10.51318/FRET.2020.36.84.001 (In Russ.)

[8] *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме.* Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии; 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 14.05.2024).

4. Кузьменков С.Г., Исаев В.И., Булатов В.И., Аюпов Р.Ш., Игенбаева Н.О., Кузьмин Ю.А. и др. Развитие нефтегазового комплекса Югры, трудноизвлекаемые запасы. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(11):103–113. https://doi.org/10.18799/24131830/2018/11/214

Kuzmenkov SG, Isaev VI, Bulatov VI, Ayupov RSh, Eginbaeva NO, Kuzmin YuA, et al. Development of Yugra Oil and Gas Complex, Hard-to-Extract Reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2018;329(11):103–113. https://doi.org/10.18799/24131830/2018/11/214 (In Russ.)

5. Барановский Н.В. *Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях грозовой активности*. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН; 2019. 235 с.

Baranovskii NV. *Forecasting of Forest Fire Danger in Conditions of Thunderstorm Activity.* Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. 235 p. (In Russ.)

6. Иванов В.А., Иванов А.В., Пономарев Е.И. Природа пожаров от гроз в лесах Сибири. В: *Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций»*. Железногорск: ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия государственной противопожарной службы»; 2018. С. 9–11.

Ivanov VA, Ivanov AV, Ponomarev EI. The Nature of Fires from Thunderstorms in the Forests of Siberia. In: *Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Monitoring, Modeling and Forecasting of Natural Hazards and Emergencies".* Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service; 2018. P. 9–11. (In Russ.)

7. Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. Москва: Диалектика; 2017. 912 с.

Dreiper N, Smit G. *Applied Regression Analysis.* Moscow: Dialektika; 2017. 912 p. (In Russ.)

8. Холопцев А.В., Никифорова М.П. *Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов.* Saarbrucken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013; 340 с.

Kholoptsev AV, Nikiforova MP. *Solar Activity and Forecasts of Physical and Geographical Processes.* Saarbrucken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013; 340 p. (In Russ.)

9. Иванова Г.А., Иванов В.А., Мусохранова А.В., Онучин А.А. Лесные пожары и причины их возникновения на территории Средней Сибири *Сибирский лесной журнал.* 2023;6:6–16. https://doi.org/10.15372/SJFS20230602

Ivanova GA, Ivanov VA, Musokhranova AV, Onuchin AA. Forest Fires and the Causes of Their Occurrence in Central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zurnal.* 2023;6:6–16. https://doi.org/10.15372/SJFS20230602 (In Russ.)

10. Копейкин М.А., Коптев С.В., Третьяков С.В. Влияние солнечной активности на лесные пожары в Архангельской области. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021;25(3):73–81. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-73-81

Kopeykin MA, Koptev SV, Tretyakov SV. Impact of Solar Activity on Forest Fires in Arkhangelsk Region. *Forestry Bulletin.* 2021;25(3):73–81. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-73-81 (In Russ.)

11. James RJ, Nkechinyere IE. The Mechanism of Thunderstorms and its Environmental Effects (A Review). *Asian Journal of Basic Science & Research.* 2022;4(3):55–60. http://doi.org/10.38177/AJBSR.2022.4308

12. Данилова Н.Е., Семенова Ю.А., Смерек Ю.Л., Закинян Р.Г. Влияние подоблачной конвекции на развитие облачной конвекции. *Наука. Инновации. Технологии.* 2018;4:131–150. https://doi.org/10.37495/2308-4758-2018-4-131-150

Danilova NYe, Semyonova YuA, Smerek YuL, Zakinyan RG. Influence Under-Cloudy Convections on Development of a Cloudy Convection. *Science. Innovations. Technologies.* 2018;4:131–150. https://doi.org/10.37495/2308-4758-2018-4-131-150 (In Russ.)

13. Васильев М.С. *Причинно-следственные связи лесных пожаров и абиотических факторов на территории Якутии*. Дис. канд. географ. наук. Москва; 2022. 220 с.

Vasilev MS. *Causal Relationships of Forest Fires and Abiotic Factors in the Territory of Yakutia.* Thesis for a Candidate Degree in Geography. Moscow; 2022. 220 p. (In Russ.)

14. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. *Физика грозовых облаков*. Москва: Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН; 2004. 38 с. URL: https://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2004_2.pdf (дата обращения: 14.05.2023).

Ermakov VI, Stozhkov YuI. *Physics of Thunderclouds.* Moscow: Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences; 2004. 38 p. URL: https://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2004_2.pdf (accessed: 14.05.2023). (In Russ.)

15. Тартаковский В.А., Чередько Н.Н. Влияние солнечной активности на приземную температуру Северного полушария. *Оптика атмосферы и океана.* 2017;30(12):1059–1064. http://doi.org/10.15372/AOO20171209

Tartakovsky VA, Cheredko NN. Sun Effect on Surface Temperature in the Northern Hemisphere. *Optika Atmosfery i Okeana.* 2017;30(12):1059–1064. http://doi.org/10.15372/AOO20171209 (In Russ.)

16. Петухов Е.И. Солнечная активность в прошлом и в наше время. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2023;2–2(77):121–124. https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-2-2-121-124

Petukhov EI. Solar Activity in the Past and in Our Time. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk.* 2023;2–2(77):121–124. https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-2-2-121-124 (In Russ.)

17. Кузнецова Э.А., Соколов С.Н., Кушанова А.У., Прасина Ю.А. Динамические особенности погодно-климатического режима города Ханты-Мансийска. *Успехи современного естествознания*. 2021;6:82–87. https://doi.org/10.17513/use.37645

Kuznetsova EA, Sokolov SN, Kushanova AU, Prasina YuA. Dynamic Features of the Weather and Climate Regime in the City of Khanty-Mansiysk. *Advances in current natural sciences*. 2021;6:82–87. https://doi.org/10.17513/use.37645 (In Russ.)

Об авторе:

Александр Вадимович Холопцев, доктор географических наук, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662970, Российская Федерация, г. Железногорск, ул. Северная, 1), SPIN-код: 2419-5410, ORCID, ScopusID, kndp@sibsa.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Aleksandr V. Kholoptsev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Department of Control and Supervisory Activity, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire and Rescue Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, 662970, Russian Federation), SPIN-code: 2419-5410, ORCID, ScopusID, kndp@sibsa.ru

Conflict of Interest Statement: **the author does not have any conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 07.06.2024
Принята к публикации / Accepted 14.06.2024